

## Praktikum

# Grundlagen der Meßtechnik

Versuchsprotokoll für den Versuch

## Operationsverstärker



Fachhochschule Fulda  
Fachbereich Elektrotechnik

## Theoretische Grundlagen

Operationsverstärker sind mehrstufige Gleichspannungsverstärker, deren Eigenschaften maßgeblich durch die äußere Beschaltung beeinflusst werden.

Ursprünglich wurden Operationsverstärker vorwiegend in der Analogrechenstechnik eingesetzt (daher der Name Operationsverstärker), heute ist der Operationsverstärker in vielen Anwendungsbereichen der Elektrotechnik (vor allem in Meß- und Automatisierungstechnik) eingesetzt.

Neben dem Standard-Operationsverstärker mit Eingangs-Differenzverstärker und Gegentakt-Endstufe aus bipolaren Transistoren wurden weitere Operationsverstärker entwickelt.

- Operationsverstärker mit speziellen Ein- und Ausgängen (z.B. BIFET-Eingang, Darlington-Eingängen und –Ausgängen, offener Kollektor-Ausgang, TTL - kompatibler Ausgang)
- programmierbare Operationsverstärker (z.B. Beeinflussung Betriebseigenschaften durch Ruhestromänderung der Transistoren)
- Operationsverstärker mit unipolarer Betriebsspannung (z.B. Norton-Verstärker)
- driftarme Verstärker (Chopper-Verstärker, driftkorrigierte Verstärker)
- Leistungsoperationsverstärker

Die Innenschaltung integrierter Standard-Operationsverstärker enthalten bis zu 20 Transistoren. Zur Vermittlung einer Grundvorstellung dient die in Bild 1 dargestellte Schaltung.  $T_1, T_2$  bilden einen Differenzverstärker mit  $T_3$  als Konstantstromquelle.

$T_4$  ist eine Kollektorstufe zur Realisierung des niedrigen Ausgangswiderstandes ( $Z_2 = R_A$ ). Die Z-Diode dient zur Potentialverschiebung. Im Ruhezustand [(+) und (-) an Masse] soll  $U_0 = 0$  sein. Die Z-Spannung der Diode muß dann  $U_Z = 0,5U_b - 0,6U_b$  betragen. Bei Differenzaussteuerung ist  $U_0 = U_{c2} - 0,5U_b$ , so daß sich eine Aussteuerung zwischen zwei Sättigungsspannungen ergibt, die in diesem Beispiel  $\pm U_S = 0,5U_b$  betragen.

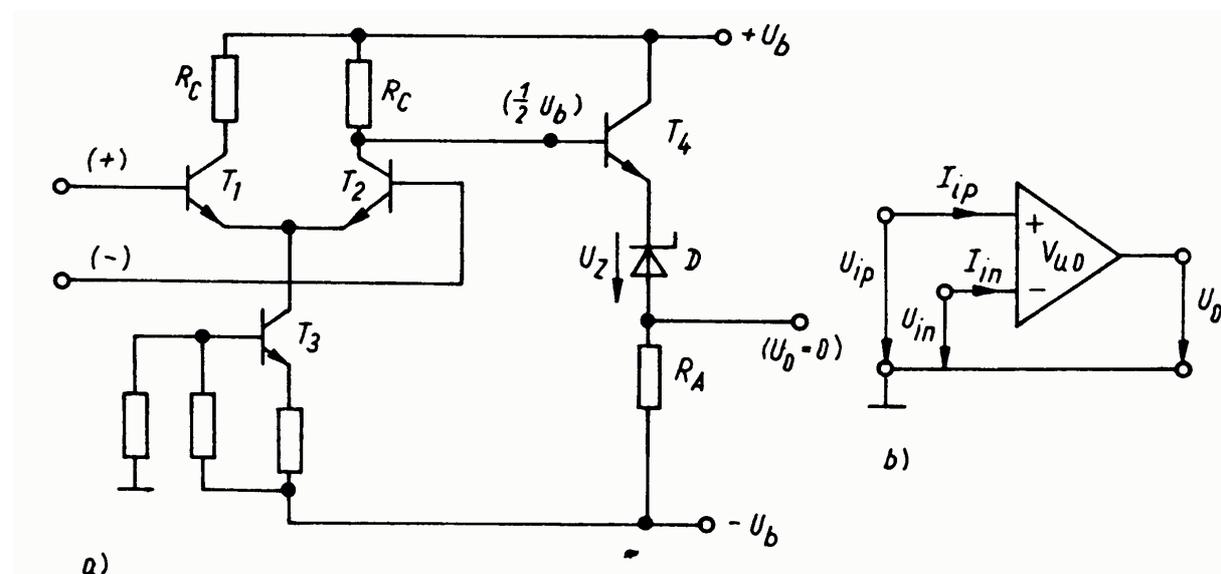


Bild 1 Operationsverstärker

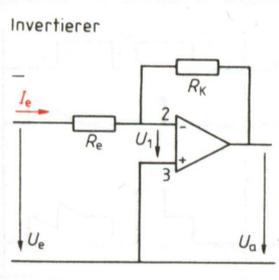
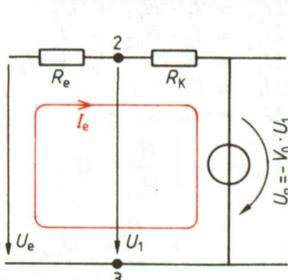
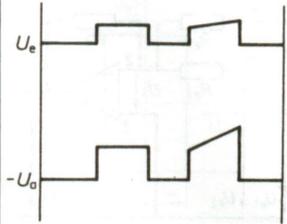
a) Einfache Innenschaltung, b) Schaltzeichen mit Spannungen und Strömen

Für die praktische Berechnung von Operationsverstärkern gibt es eine wichtige Formel  $U_A = A(U_{ip} - U_{in})$  und drei wichtige Regeln, die beachtet werden müssen:

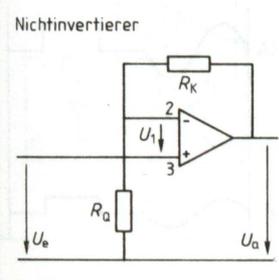
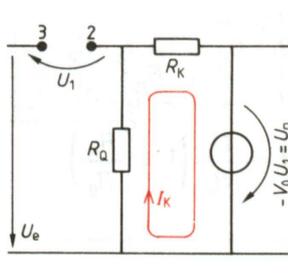
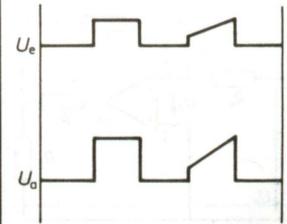
- Die Ausgangsspannung stellt sich immer so ein, daß an beiden Eingängen die gleiche Spannung anliegt, also  $U_{ip} - U_{in} = 0$ .
- An den Eingängen des Operationsverstärkers fließt weder ein Strom hinein noch heraus.
- Die Ausgangsspannung des Operationsverstärkers ist von der Belastung unabhängig. Der Ausgangswiderstand ist Null.

Da während dieses Versuches verschiedene Beschaltungen des Operationsverstärkers betrachtet werden sollen, werden diese in der theoretischen Betrachtung kurz vorgestellt und die Formeln anhand der obigen Regeln hergeleitet.

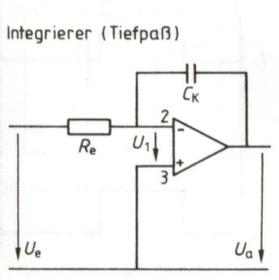
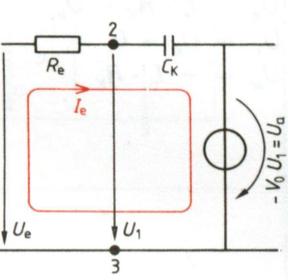
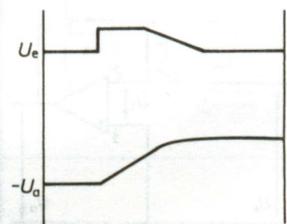
## 1. Invertierender Verstärker

Schaltung, Benennung	Ersatzschaltung	Formeln, Herleitung	Spannungsverläufe
<p style="margin: 0;">Invertierer</p> 		$I_e \cdot R_K + U_a = 0$ $I_e \cdot R_e + U_1 = U_e$ $U_1 \approx 0$ $U_a = -I_e \cdot R_K$ $U_e = I_e \cdot R_e$ $\frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_K}{R_e}$	

## 2. Nichtinvertierender Verstärker

<p style="margin: 0;">Nichtinvertierer</p> 		$U_1 \approx 0$ $U_e = -I_K \cdot R_Q$ $U_a = -I_K \cdot (R_Q + R_K)$ $\frac{U_a}{U_e} = 1 + \frac{R_K}{R_Q}$	
--	---	---	---

## 3. Integrierer (Tiefpaß)

<p style="margin: 0;">Integrierer (Tiefpaß)</p> 		<p style="margin: 0;">Die Herleitung der Übertragungsfunktion erfolgt entsprechend wie beim Invertierer</p> $\frac{U_a}{U_e} = -\frac{X_C}{R_e}$ $= -\frac{1}{R_e \cdot \omega \cdot C_K}$	
---	---	--	---

#### 4. Summierverstärker

Schaltung, Benennung	Ersatzschaltung	Formeln, Herleitung	Signalverläufe
		$U_{e1} = I_1 \cdot R_{e1} + U_1$ $U_{e2} = I_2 \cdot R_{e2} + U_1$ $U_1 = R_K (I_1 + I_2) + U_a$ $U_1 \approx 0$ $U_a = -R_K (I_1 + I_2)$ $U_a = - \left[ \frac{R_K}{R_{e1}} \cdot U_{e1} + \frac{R_K}{R_{e2}} \cdot U_{e2} \right]$	

## Versuchsdurchführung

Auf die komplette Herleitung der Formeln wurde in diesem Teil verzichtet, da diese schon im Theorieteil zum größten Teil hergeleitet wurden. Hier finden sich nur noch weiterführende Herleitungen. Außerdem wird die Formel für die Parallelschaltung von Widerständen als bekannt vorausgesetzt.

1. Für die Messung des invertierenden Verstärkers wurde die Schaltung wie unter 1. dargestellt aufgebaut. Um die vorgeschriebene Verstärkung  $V=4$  zu erreichen, hatten wir für den Widerstand  $R_e$  eine Parallelschaltung aus  $3,3k\Omega$  und  $10k\Omega$  genommen, um dadurch einen Widerstand von etwa  $2,5k\Omega$  zu erzielen; für den Widerstand  $R_K$  wählten wir einen Widerstand von  $10k\Omega$ . Damit war es uns möglich ein Widerstandsverhältnis zwischen  $R_K$  und  $R_e$  von annähernd 4 zu erzielen. So wurde die Ausgangsspannung um den Faktor  $V$  größer. Diese Schaltung wurde dann mit einem Sinus und einem Dreieckssignal aus dem Frequenzgenerator getestet. Die Meßergebnisse sind den Skizzen zu entnehmen, die während der Messung vom Oszilloskopen abgemalt wurden.

$$U_a = -\frac{R_K}{R_e} \cdot U_e$$

2. Bei der Messung am nichtinvertierenden Verstärker wurde die Schaltung wie unter 2. dargestellt aufgebaut. Für die Widerstände  $R_K$  und  $R_Q$  wurden Widerstände von  $10k\Omega$  und  $3,3k\Omega$  verwendet, um das verlangte Verstärkungsverhältnis von 4 zu erreichen ( $10/3,3+1=4$ ). Auch diese Schaltung wurde mit denselben Eingangssignalen wie unter 1. belastet. Die Meßergebnisse, die sich dabei auf dem Oszilloskop ergaben wurden ebenfalls auf dem beigelegtem Blatt skizziert.

$$U_a = \left( 1 + \frac{R_K}{R_Q} \right) \cdot U_e$$

3. Der Integrierer wurde gemäß 3. aufgebaut, und mit diversen Signalen belastet, die später noch genauer aufgeführt werden. Da die Herleitung unter 3. nicht den zeitlichen Verlauf der Ausgangsspannung  $U_a$  wiedergibt wird diese hier ergänzt.

$$I_e(t) = 0 \quad \text{für } -\infty \leq t \leq \infty$$

$$\Rightarrow I_{R_e}(t) = -I_{C_K}(t) \quad \langle 1 \rangle$$

$$U_e(t) = I_{R_e}(t) \cdot R_e \quad \langle 2 \rangle$$

$$I_{C_K}(t) = C \cdot \left( \frac{dU_a(t)}{dt} \right) \quad \langle 3 \rangle$$

Aus  $\langle 1 \rangle$  und  $\langle 3 \rangle$  folgt:

$$I_{R_e}(t) = -C \cdot \left( \frac{dU_a(t)}{dt} \right) \quad \text{dies in } \langle 2 \rangle \text{ eingesetzt ergibt:}$$

$$U_e(t) = -C \cdot \left( \frac{dU_a(t)}{dt} \right) \cdot R_e \quad \text{Auf beiden Seiten mit } C \text{ und } R_e \text{ dividieren und mit } dt \text{ multiplizieren ergibt:}$$

$$\int dU_a(t) = \int \frac{dU_e(t)}{-C \cdot R_e} dt$$

$$\Rightarrow U_a(t) = -\frac{1}{C \cdot R_e} \int_{t_0}^t dU_e(\tau) \cdot d\tau$$

Für die Spannung  $U_e$  werden 4 unterschiedliche, zeitveränderliche Signale verwendet, die in der Tabelle 1 aufgeführt sind.

Farbe $U_e$	Signalart $U_e$	Farbe $U_a$	Signalart $U_a$
grau	Kosinus	d. blau	Sinus
orange	Sägezahn	h. blau	Parabeln nach unten offen
schwarz	Dreieckssignal	rosa	Parabeln mit VZW.
grün	Rechteckpuls	rot	Dreieckssignal mit VZW.

Wenn man sich die Ausgangsspannungen  $U_a$  ansieht, stellt man fest, daß die Schaltung tatsächlich einen mathematischen Integrierer bildet, bei dem allerdings nicht nach der Strecke  $x$  integriert wird sondern nach der Zeit  $t$ . Eine weitere Eigenheit der Schaltung ist es, daß das Ausgangssignal dem invertiertem Integral der Eingangsfunktion entspricht, was sich bereits an der Herleitung ergibt. Der Verstärkungsfaktor hängt dabei offensichtlich von den Bauteilen  $C$  und  $R_e$  ab, d.h um so kleiner die Bauteile dimensioniert werden um so größer ist die Verstärkung. Diesen Effekt kann man allerdings auch über die Frequenz der Eingangssignale steuern, da bei steigender Frequenz die Steilheit der Eingangssignale zunimmt.

4. Bei der letzten Schaltung wurde das Verhalten des Summierers getestet. Diese Schaltung wurde gemäß 4. aufgebaut und an den Eingängen mit einem Sinus- und Rechtecksignal belastet. Das Ausgangssignal war dabei die invertierte Summe der beiden einzelnen Signale. Für die Darstellung am Oszilloskopen invertierten wir die Spannung  $U_a$ , damit wir die positive Summe der einzelnen Signale darstellen können. Ein interessanter Nebeneffekt dieser Schaltung ist die Gewichtung der einzelnen Eingangssignale über die Widerstandsverhältnisse  $R_K/R_{e1}$  bzw.  $R_K/R_{e2}$ .

## Fehlerbetrachtung

Da bei diesem Versuch keine expliziten Meßergebnisse aufgezeichnet wurden kann keine Fehlerrechnung durchgeführt werden. Der Zeichenfehler, bei der Skizzierung der Ergebnisse vom Oszilloskopen auf Papier auftritt ist auch zu vernachlässigen, da es nur auf das prinzipielle Verhalten des Operationsverstärker ankommt.

Bei der Skizze für den Integrierer ist noch darauf aufmerksam zu machen, daß das Integral des Dreiecksignals nur in erster Näherung als trigonometrische Funktion angesehen werden kann, da es sich in Wirklichkeit um aneinander gesetzte Parabeln mit unterschiedlichen Vorzeichen handelt.

## Literaturangaben

Für die theoretische Beschreibung und das Ersatzschaltbild für den Operationsverstärker wurde folgendes Buch verwendet:

- Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik; Lindner Bauer Lehmann; Verlag Harri Deutch; 3. Neubearbeitete Auflage 1989

Die verschiedenen Grundsaltungen mit dem Operationsverstärker stammen aus dem Buch:

- Tabellen & Schaltungen; Sonderausgabe für die Deutsche Bundespost; G. Häberle; KOHL + NOLTEMEYER & Co. VERLAG GmbH und FRANKFURTER FACHVERLAG GmbH & Co KG; 1990